

JUMEAU NUMÉRIQUE : APPROCHES POUR LE MAINTIEN D'UN INVENTAIRE GÉOLOCALISÉ EN TEMPS RÉEL D'UNE COUR À BOIS

S. NANTEL, J. GAUDREULT

F. LÉGER

Consortium de recherche en ingénierie des systèmes industriels 4.0
Université Laval
2325 rue de l'université Québec - Canada
sebastien.nantel.1@ulaval.ca, jonathan.gaudreault@ift.ulaval.ca

PMPSolutions
300 rue Dieppe
Québec, Québec - Canada
francois.leger@pmpsolutions.ca

RÉSUMÉ : *Pour l'industrie du sciage, l'automatisation des processus décisionnels passe par le maintien d'un inventaire géolocalisé de la cour à bois. Cela constitue un défi technique considérable, notamment parce qu'il s'agit d'un environnement extérieur hostile à la merci des intempéries et où il n'existe pas d'emplacement prédéfini d'entreposage des produits. Nous avons donc entrepris la création d'un jumeau numérique permettant de maintenir en temps réel l'inventaire géolocalisé (x,y,z) d'une cour à bois, malgré le fait que les signaux émanant du monde réel (ex. : coordonnées GPS de la chargeuse) soient bruités. Nous proposons des algorithmes permettant de maintenir le modèle à jour en temps réel. Des expérimentations sont réalisées à partir de données industrielles afin d'identifier le niveau maximal d'incertitude sur les coordonnées GPS tolérable. Les résultats montrent qu'avec nos algorithmes, il serait possible de maintenir l'inventaire à jour en faisant usage de technologies de localisation existante et en adoptant des pratiques d'affaires légèrement modifiées.*

MOTS-CLÉS : *Jumeaux numériques, Industrie 4.0, Simulation, Industrie du bois, Gestion d'inventaire*

1 INTRODUCTION

La production de bois d'œuvre nord-américaine implique plusieurs processus complexes. Dès leur arrivée en usine, les billots de bois sont sciés en plusieurs pièces de longueur, de largeur et d'épaisseur variées. Elles sont alors triées en fonction de leurs dimensions, de l'essence du bois pour ensuite être assemblées sous forme de paquets prenant la forme d'un prisme rectangulaire comptant quelques centaines de pièces identiques (Figure 1). Ceux-ci sont transportés vers une cour extérieure, *la cour à bois*, afin d'y être entreposés temporairement. Étant donné la taille et le poids des paquets, la manutention de ces derniers nécessite l'utilisation d'équipements de transport spécialisés, telle que des chargeuses frontales (Figure 2). Celles-ci doivent être opérées par du personnel qualifié. Éventuellement, les paquets sont transportés de nouveau vers des séchoirs industriels afin d'y être séchés (les paquets sont assemblés sur un wagon qui est ensuite poussé dans le séchoir). Le séchage peut prendre jusqu'à quelques jours. Une fois ce processus terminé, les paquets sont, une fois de plus, transportés et stockés dans la cour pour finalement être envoyés à l'usine de finition. Durant ce dernier processus, les paquets sont désassemblés, les pièces sont rabotées, éboutées et les pièces obtenues sont triées par lon-

gueur et par qualité.



FIGURE 1 – Paquets de bois

Dans une optique de modernisation des processus d'affaires et d'amélioration de la performance, l'industrie tend à automatiser et optimiser ses activités. Au-delà des aspects physiques liés à la transformation de la matière, l'enjeu se situe au niveau de l'optimisation des processus logistiques, le tout dans une perspective Industrie 4.0 (Müller, F., 2019). Ces dernières années ont vu l'adoption d'un nombre crois-



FIGURE 2 – Exemple d’une chargeuse frontale utilisée dans la manutention de paquets de bois

sant de systèmes décisionnels pour la prise de décision concernant la gestion des opérations du sciage (Gaudreault J. et al., 2010) (Zanjani M.K. et al., 2011), du séchage (Gaudreault J. et al., 2011) (Marier P. et al., 2016) (Theresia J. et al., 2019) et du rabotage (Marier P. et al., 2014), en plus bien sûr de la gestion des approvisionnements (Beaudoin D. et al., 2006) (Zanjani M.K. et al., 2016), de la logistique et des ventes (Bajgiran O.S. et al., 2016).

Toutefois, bien que la gestion de la cour à bois soit reconnue comme un élément clé dans le processus de transformation du bois (Dramm JR., 2004), celle-ci n’est pas prise en compte lors des prises de décisions. Dès leur sortie du sciage ou du séchoir, les paquets de bois sont entreposés dans la cour selon un arrangement et une disposition généralement laissés à la discrétion de l’opérateur de la chargeuse. Les décisions quant aux choix des produits qui seront séchés et rabotés sont, quant à elles, prises quelques jours plus tard, souvent à l’aide d’un algorithme d’optimisation sans égard à l’emplacement courant des paquets. Pourtant, il y a un potentiel de gain important en ce qui concerne l’efficacité de la cour de prendre ces décisions de manière à optimiser les déplacements de la chargeuse dans la cour (Trzcianowska M. et al. 2019). Cette optimisation/planification des déplacements permettrait également, éventuellement, d’automatiser la gestion des déplacements des paquets dans la cour à bois. De plus, cela permettrait une meilleure optimisation des opérations sous-jacentes, notamment sur le choix des paquets à sécher et raboter plutôt que seulement le produit, et ce, en tenant compte des déplacements induits. À terme, les décisions concernant le sciage, le séchage, la finition et la gestion de la cour seraient prises de manière synchronisée.

Toutefois, cette automatisation et cette optimisation passent, avant tout, par le maintien d’un inventaire géolocalisé de la cour à bois (Dumetz L., 2014). Le

maintien de cet inventaire constitue un défi technique considérable, notamment parce qu’une cour à bois n’est pas un entrepôt classique : il s’agit plutôt d’un environnement extérieur hostile à la merci des intempéries et où il n’existe pas d’emplacement prédéfini d’entreposage des produits. Les approches actuelles rendent difficile de s’acquitter de cette tâche. Par ailleurs, des essais antérieurs de suivi à l’aide de puces RFID n’ont pas donné de résultats positifs, notamment par manque de fiabilité lors de la manutention de plusieurs paquets à la fois (Pieskä S. et al., 2009), près de bâtiment et dans un environnement entouré de centaines de paquets. Quant aux codes à barres, des étiquettes sont déjà présentes sur les paquets ; elles sont scannées lors des entrées dans les bâtiments, mais leur lecture automatique par les chargeuses lors de la manutention en présence de boue, de neige et de glace pose problème.

Nous avons donc entrepris la création d’un *jumeau numérique* (Boschert S. et Rosen R., 2016) permettant de maintenir en temps réel l’inventaire géolocalisé d’une cour à bois ainsi que les dispositifs pour le mettre à jour en temps réel, et ce, malgré le fait que les signaux émanant du monde réel (ex. : coordonnées GPS de la chargeuse) soient bruités.

L’architecture de ce jumeau numérique est décrite à la section 2. Ensuite, à la section 3, nous comparons la performance de différents algorithmes destinés à maintenir l’intégrité des données. Cela nous permettra d’identifier le niveau maximal d’incertitude sur les coordonnées GPS tolérable afin de maintenir l’inventaire géolocalisé d’une cour à bois. Les expérimentations sont réalisées à partir de données provenant d’un partenaire industriel. Finalement, la section 4 conclut cet article.

2 JUMEAU NUMÉRIQUE

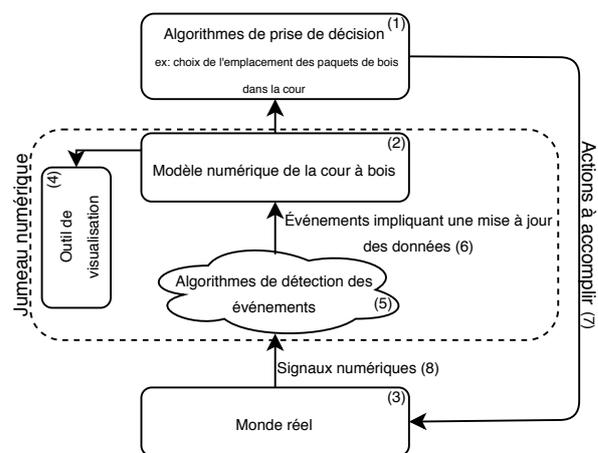


FIGURE 3 – Séquence d’interaction permettant une prise de décision à partir de signaux numériques
La figure 3 synthétise l’architecture proposée. L’élé-

ment central (2) est une base de données contenant pour chaque paquet son emplacement géolocalisé (longitude, latitude), sa hauteur par rapport au sol (les paquets pouvant être superposés) ainsi que son orientation. Les coordonnées de localisation et d'orientation sont également disponibles pour la chargeuse frontale. On y trouve aussi différentes informations de nature statique, telles que la position des infrastructures de la cour (ex. : bâtiments et séchoirs). Le tableau 1 synthétise ces données.

Équipements	Type de données utilisées
Chargeuse	Géolocalisation et orientation
Paquets de bois	Géolocalisation, orientation et élévation
Séchoirs	Géolocalisation
Rails de chargement de séchoirs	Géolocalisation
Sortie du sciage	Géolocalisation
Entrée du rabotage	Géolocalisation
Emplacements de stockage	Géolocalisation

Tableau 1 – Type de données utilisées par le modèle numérique afin de maintenir à jour la représentation de la cour à bois

Ce modèle de données pourra à terme être exploité par différents algorithmes de prise de décisions (1) qui permettront de faire des choix quant aux actions à poser dans le monde réel. Sur la base de ces décisions et d'autres événements survenant en usine, des modifications à l'état physique de la cour surviennent dans le monde réel (3).

Il est nécessaire de détecter ces modifications. Nous pouvons le faire grâce à la captation et l'interprétation de différents signaux numériques (8). Les principaux signaux numériques sont la position GPS de la chargeuse dans la cour (une série de point permettant aussi de déduire l'orientation de la chargeuse). On dispose également du moment de ramassage de paquets (et leur nombre) ainsi que le moment du dépôt de paquets. Cette information peut être déduite des pressions d'huiles dans les bras de la chargeuse.

Il est donc nécessaire, grâce à des algorithmes (5) analysant ces données bruitées d'inférer quels événements (6) ont eu lieu et de mettre à jour la base de données (2).

Un outil de visualisation (4) permet de constater en temps réel l'état de la cour (ou plutôt, de son jumeau numérique) de manière visuelle (Figure 4). Cet outil a joué un rôle primordial lors de la validation du système développé (Section 2.1).

2.1 Validation

Nous avons travaillé avec une scierie qui nous a donné accès à ses installations. Nous avons tout d'abord modélisé la cour (emplacement des bâtiments et infrastructure) à l'aide de données de géolocalisation et de cartes satellites. Par la suite, une caméra vidéo a été installée à bord d'une chargeuse frontale. Celle-ci

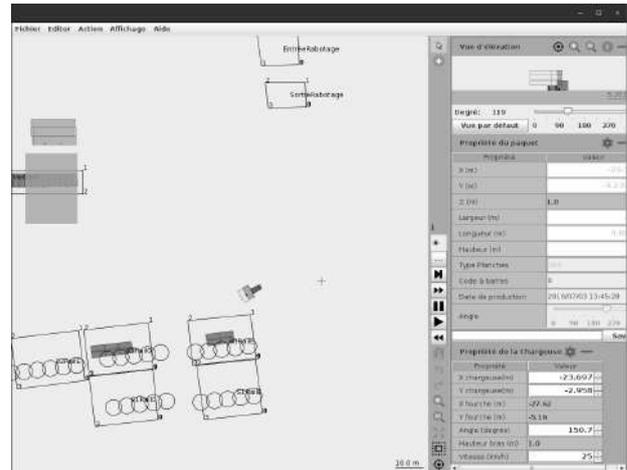


FIGURE 4 – Outil de visualisation du jumeau numérique de la cour à bois

était également équipée d'une balise GPS et de capteurs de pression permettant d'obtenir des signaux de pression d'huile associée au ramassage et au dépôt de paquets. Cela nous a permis de définir un scénario (une liste d'événements) décrivant fidèlement ce qui s'était passé cette journée-là.

L'identification d'une liste des événements de ramassage et de dépôt de paquets ainsi que l'identification des paquets ramassés ont été faites manuellement à l'aide de la vidéo, des pressions d'huile à l'intérieur du cylindre hydraulique du mât de la chargeuse ainsi que de l'horodatage des signaux. Lors du visionnement de la vidéo, l'horodatage des moments de ramassage et de dépôt de paquets a été identifié dans cette dernière. Cet horodatage a permis, par la suite, de retrouver les signaux transmis par la chargeuse à ce moment (position GPS et pression d'huile). À l'aide des données de pression d'huile et de la vidéo, les moments de ramassage et de dépôt ont été identifiés avec précision. Pour chaque moment de ramassage/dépôt identifié dans la vidéo représentant le cas de tests, il a également fallu identifier combien et quels paquets étaient ramassés.

Étant donné que les coordonnées GPS de la chargeuse étaient bruitées, nous avons pu corriger celles-ci puisque nous connaissions le positionnement exact des paquets. En effet, en assignant la coordonnée du paquet nous avons corrigé manuellement, à l'aide de l'outil de visualisation, la coordonnée de la chargeuse, et ce, pour le moment exact de ramassage ou de dépôt du paquet. De ce fait, la correction effectuée sur les données de géolocalisation de la chargeuse a permis de compenser l'incertitude sur les signaux initiaux de positionnement de la balise GPS fournissant ainsi un modèle de référence pour nos expérimentations à venir.

La validation du scénario de référence (liste des événements précédemment identifiés) s'est faite à l'aide de l'outil de visualisation. En effet, en alimentant l'outil

de visualisation avec cette série d'événements, il est alors possible de rejouer le film de la journée de manière virtuelle. En comparant ce dernier avec la vidéo, nous avons alors pu vérifier l'exactitude de notre liste d'événements. Cela montre bien que si la perception des données de géolocalisation et des événements est exacte, il est possible de maintenir le modèle numérique de la cour à bois à jour.

2.2 Incertitude des coordonnées géographiques

Il existe plusieurs niveaux d'incertitudes différents quant à la géolocalisation de la chargeuse. Cette incertitude dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de balise utilisé (Wing M.G., et al., 2005), la présence de bâtiments à proximité (Williams, M. et Morgan, S., 2009), etc. De plus, d'après une étude de la Federal aviation administration (FAA), l'incertitude associée à la composante horizontale est de 1,891 mètre 95% du temps alors que pour la composante verticale, l'incertitude est de 3,872 mètres 95% du temps (Team G.P., 2017).

Il est généralement reconnu que pour une balise GPS standard l'incertitude moyenne est de plus ou moins trois mètres (US DoD, 2020), mais elle peut parfois être d'aussi peu qu'un mètre (Wing M. et al., 2005). Toutefois, pour un véhicule en mouvement, cette incertitude varie davantage. En effet, l'incertitude associée à une balise de type commerciale est d'environ 15 mètres alors que pour une balise professionnelle, l'incertitude est plutôt de l'ordre du mètre (Sun Q., et al., 2017).

L'incertitude associée peut être réduite en faisant usage d'une technique avancée de positionnement, telle que le Differential GPS (DGPS)(Zogg J.M., 2009). Le DGPS fait appel à du matériel supplémentaire pour capter des signaux provenant de stations terrestres fixes. L'incertitude peut être ramenée à l'ordre du mètre, ou même du centimètre selon le type de balise utilisé, la technique de correction du signal de positionnement utilisée et l'utilisation de techniques de post-traitement des données (Skoglund M. et al., 2016)(Ogaja C., 2016). Avec un DGPS, le même niveau d'incertitude est rapporté pour les véhicules en mouvement (Sun Q.C. Et al., 2017). Il faut cependant noter que les études se contredisent quant à la précision de ces approches.

2.3 Algorithmes de détection des événements

Cette section présente des algorithmes pour réaliser la détection des événements associés aux déplacements de paquets dans la cour à bois. Ceux-ci permettent de compenser (jusqu'à une certaine limite) l'incertitude sur les signaux de géolocalisation de la chargeuse dans la cour à bois.

Nous proposons deux alternatives distinctes. Un premier algorithme exploite les données GPS, les signaux de ramassage et de dépôt obtenus de la chargeuse ainsi que la connaissance de certaines règles d'affaires concernant la manière dont les paquets doivent être ramassés. Le second algorithme est en mesure d'utiliser uniquement les données GPS, mais suppose une meilleure connaissance a priori de certaines règles d'affaires.

2.3.1 Algorithme #1 : Détection des événements en fonction de la position de la chargeuse et des signaux de ramassage et de dépôt obtenus des bras de la chargeuse

Cet algorithme se base sur deux groupes de signaux numériques distincts, soit des signaux de positionnement de la chargeuse dans la cour transmis à l'aide d'une balise GPS installée sur la chargeuse ainsi que des signaux numériques indiquant les moments de ramassage, le nombre de paquets ramassés et les moments de dépôt de paquets. La figure 5 présente la séquence d'interaction de cet algorithme.

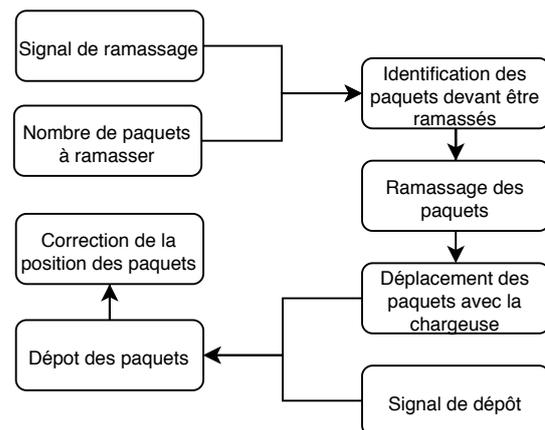


FIGURE 5 – Séquence d'interaction de l'algorithme #1

Lorsqu'un signal de ramassage est détecté (par exemple, les pressions d'huile des bras nous indiquent que 4 paquets ont été ramassés), l'algorithme identifie alors les paquets qui se trouvent au-dessus des bras de la chargeuse et suppose que les 4 paquets les plus hauts (ex. : 2 paquets de hauts par 2 paquets de profonds) ont été ramassés.

On suppose que les paquets identifiés se déplacent ensuite avec la chargeuse. Lors de la détection ultérieure d'un signal de dépôt, on suppose que les paquets sont déposés à l'emplacement actuel de la chargeuse (ou plutôt, des bras de la chargeuse). Leur position est alors corrigée en fonction de l'emplacement où ils se trouvent. Par exemple, les paquets déposés sur un rail de séchoir sont alignés avec ce dernier (pour cor-

riger l'imprécision du signal GPS). La coordonnée z (élévation) est corrigée en fonction de la hauteur des paquets déjà présents.

Cet algorithme repose sur la prémisse qu'il est possible en tout temps de connaître la masse portée par la chargeuse (nombre de paquets). Or, cela nécessite un équipement coûteux et pas nécessairement fiable. Pour cette raison, nous avons également imaginé un algorithme travaillant uniquement avec le signal GPS. Celui-ci est présenté à la section suivante.

2.3.2 Algorithme #2 : Détection des événements en fonction des entrées/sorties de zones

On suppose tout d'abord que la cour est séparée en différentes zones. Une zone est un espace logique, non physiquement délimité, de la cour où pourraient se trouver plusieurs paquets apparentés. Notamment, les emplacements possibles d'entreposage de paquets, les rails de séchoir, la sortie du sciage et l'entrée du rabotage sont tous considérés comme des zones distinctes.

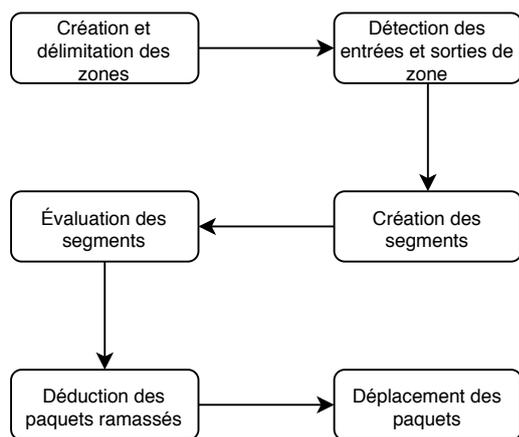


FIGURE 6 – Séquence d'interaction de l'algorithme #2

Le signal GPS est utilisé pour détecter les entrées/sorties de chaque zone. Chaque paire « sortie d'une zone X / entrée dans une zone Y » est identifiée comme étant un segment. Pour chaque type de segment possible, nous avons établi au préalable des règles d'affaires qui nous permettent d'induire si ce déplacement est réputé se faire à vide, avec 1, 2 ou 4 paquets. Par exemple, dans le cas où un segment aurait pour zone de départ un emplacement de stockage de bois non séché et pour zone d'arrivée un rail de séchoir, l'algorithme présumera qu'un déplacement sur ce segment correspond à un déplacement de paquets. Toutefois, l'inverse ne serait pas considéré comme un déplacement de paquets valide. Des règles d'affaires supplémentaires ainsi que la position d'entrée de la chargeuse dans la zone permettent également de déduire quels paquets ont été ramassés. Par exemple,

supposons une entrée à une extrémité d'une zone représentant un rail de séchoir. Cette position d'entrée permettra de conclure que ce sont les paquets les plus près de cette extrémité qui seront ramassés.

La figure 6 présente la séquence d'interaction de l'algorithme #2 pour un segment réputé se faire avec des paquets de bois. De plus, la figure 7 présente un exemple simplifié d'analyse des segments impliqués dans le processus de chargement du rail de chargement A et du processus de déchargement du rail de chargement B.

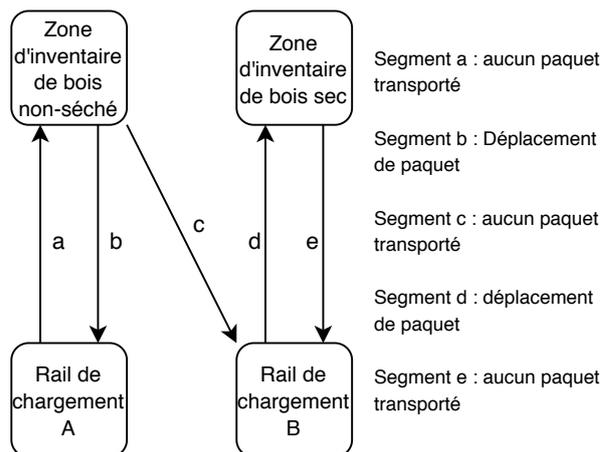


FIGURE 7 – Exemple d'analyse de segments impliqués dans le processus de chargement du rail A et du processus de déchargement du rail B

3 EXPÉRIMENTATION : IMPACT DE L'INCERTITUDE DES DONNÉES GPS

Nous évaluerons à quel point l'incertitude sur la position GPS de la chargeuse a un impact sur la performance des algorithmes précédents (et donc sur la capacité à maintenir notre inventaire géolocalisé). Nous utiliserons comme scénario de référence celui décrit à la section 2.1. Celui-ci permet de reproduire dans le jumeau numérique de manière exacte tous les déplacements de paquets qui se sont produits à l'usine lors de notre période de référence. Nous comparerons ensuite les résultats du scénario de référence avec les résultats que nous aurons obtenus pour différents niveaux de précision GPS.

L'algorithme #1 (détection des événements sur la base de la position de la chargeuse et des moments de ramassage et de dépôt) permet de reproduire intégralement le scénario de référence si les coordonnées précises (non bruitées) lui sont indiquées. Par la suite, nous rejouons le scénario, mais une erreur est ajoutée sur chaque signal de position de la chargeuse permettant ainsi de simuler l'incertitude d'une balise GPS. Nous avons simulé six niveaux d'incertitudes distincts, soit une incertitude de plus ou moins trois mètres (incertitude moyenne pour une balise GPS

commerciale (US DoD, 2020)), deux mètres (niveau de précision le plus probable d'après les données de la FAA (Team G.P, 2017)), un mètre (incertitude atteignable pour des balises commerciales (Wing M. et al., 2005)), trente centimètres (incertitude moyenne d'un DGPS (Sun Q. et al., 2017), dix centimètres (incertitude moyenne pour un véhicule en mouvement avec la technique de position RTK (Sun Q. et al., 2017)) et deux centimètres (niveau de précision maximale atteignable d'après certaines études (Dong Y. et al., 2020)). L'incertitude ajoutée au signal de géolocalisation est générée aléatoirement, mais de manière séparée pour la composante horizontale et verticale en fonction d'une loi normale de moyenne 0 et de variance égal à l'incertitude maximale (Tiberius CCJM. et Borre K, 2000) (Zandbergen PA., 2008).

Lors de la simulation, les paquets de bois sont ramassés d'après les conclusions de l'algorithme de détection des événements, puis on compare les paquets ramassés dans le jumeau numérique avec ceux du scénario de référence. En cas de contradiction entre le scénario de référence et les choix faits par l'algorithme, il y aura une désynchronisation dont nous prendrons note.

Par exemple, supposons que lors d'un événement de ramassage, l'algorithme de construction de segments choisit de ramasser les paquets 1 et 2 alors que, selon le scénario de référence, ce sont les paquets 2 et 3 qui sont ramassés. Dans ce cas, le paquet 1 est considéré comme perdu. Le paquet 3 est également considéré comme perdu puisque le modèle numérique de la cour a perdu la trace de ce paquet. Notons, par ailleurs, que chaque paquet ne peut pas être considéré perdu plus d'une fois.

Il peut arriver qu'un paquet ne soit pas ramassé, mais qu'un autre paquet du même type (même produit, mais pas le même paquet) soit ramassé. C'est alors une faute moindre. Pour cette raison, nous analyserons les résultats à l'égard de deux mesures de performance distinctes : (1) le nombre de paquets perdus en supposant que l'entreprise désire assurer le suivi de chaque paquet individuel d'après son identifiant unique et (2) le nombre de paquets perdus en supposant que l'entreprise désire assurer le suivi par type de produit (on veut savoir qu'il y a un paquet de bois de tel type à cet endroit, mais sans le distinguer d'un autre paquet du même type).

4 RÉSULTATS

Chaque simulation a été répétée 50 fois. Les résultats moyens avec intervalle de confiance (niveau de confiance de 95%) sont ici rapportés.

4.1 Performance pour le suivi des paquets individuels

Les résultats sont rapportés à la figure 8. Avec l'algorithme #1 et l'absence d'erreur GPS, on reproduit sans surprise le scénario de référence de manière intégrale. Pour les deux algorithmes, on observe une augmentation du nombre de paquets perdus à mesure que l'incertitude sur la position de la chargeuse dans la cour augmente. Pour de très petites erreurs GPS (moins de 10 cm) l'algorithme #1 semble préférable. Pour des erreurs supérieures à 10 cm, l'algorithme #2 performe mieux, ce qui est remarquable étant donné que ce dernier utilise moins de signaux. En moyenne, on observe une perte de 11,75 paquets avec l'algorithme #2 versus 17,34 paquets perdus par l'algorithme #1, soit une différence de 6,73%.

En comparant le «film» de la simulation avec le scénario de référence, on peut comprendre davantage d'où proviennent les erreurs. Avec l'algorithme #1 (détection des événements sur la base de la position de la chargeuse et des moments de ramassage et de dépôt), lorsque la chargeuse est positionnée tout près de plusieurs paquets, l'incertitude sur sa position réelle peut engendrer bon nombre d'erreurs au moment d'identifier les paquets ramassés étant donné que cette identification se fait seulement en fonction de la position de la chargeuse. De plus, étant donné l'incertitude sur la position de la chargeuse au moment de déposer des paquets, il peut survenir qu'un paquet soit déposé sur un autre alors qu'il a en réalité été déposé un peu à côté au sol. Cela fera qu'au moment de ramasser de nouveau ce paquet, le mauvais paquet sera identifié étant donné que l'empilement devant la chargeuse n'est pas le bon. Nous avons remarqué qu'une erreur de 30 centimètres (négligeable dans un plan x,y) est suffisante pour engendrer une grande perturbation selon l'axe des z. Il faut descendre à une précision de 2 cm pour s'affranchir de ce type d'erreurs. Dans le cas contraire, le nombre de paquets perdus est beaucoup trop important pour considérer cette approche comme étant viable.

Pour l'algorithme #2 (détection des événements en fonction des entrées et sorties de zone), une très grande erreur GPS est nécessaire pour rater une entrée/sortie de zone. On note malgré tout une dizaine de paquets (toujours les mêmes) qui sont perdus, même lorsque l'erreur GPS est négligeable. Il s'avère que ce sont des déplacements pour lesquels l'opérateur a dérogé aux pratiques établies. Par exemple, lors d'un ramassage de deux paquets, ce sont normalement les deux paquets situés côte à côte au sommet d'une extrémité de la zone qui sont ramassés; si l'opérateur déroge à cette règle, on perd alors des paquets. Notons que ces règles d'affaires n'étaient pas des règles officielles; elles ont été déduites en analysant le comportement de l'opérateur de la chargeuse.

Il serait cependant envisageable de formaliser davantage ces règles d'affaires et ainsi nous n'aurions pas observé de pertes de paquets avec l'algorithme #2 pour une erreur GPS de moins de 30 cm. Au-delà de 30 centimètres, l'incertitude sur la position de la chargeuse au moment de son entrée dans une zone devient trop importante pour identifier correctement tous les paquets ramassés. Des règles d'affaires supplémentaires (ex. : spécifier l'ordre dans lequel les paquets d'un chargement doivent être chargés/déchargés d'un séchoir) permettraient une plus grande tolérance à l'erreur de position GPS.

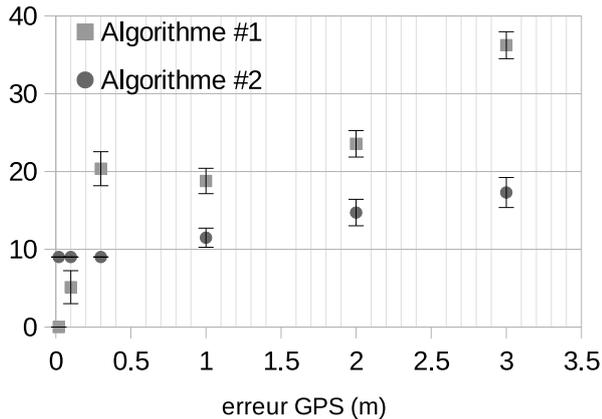


FIGURE 8 – Nombre de paquets perdus par chaque algorithme en fonction de l'erreur GPS (suivis des paquets individuels)

4.2 Suivi par type de produit

On remarque sur la figure 9 que le nombre de paquets perdus est beaucoup moins élevé que pour la figure 8 étant donné que certaines inversions de paquets (qui étaient des erreurs avec la mesure de performance précédente) ne sont plus considérées comme des erreurs.

Pour l'algorithme #1, l'erreur est réduite d'environ 8% en moyenne. Toutefois, le nombre de paquets en erreur augmente rapidement à mesure que l'incertitude augmente également. Pour l'algorithme #2, plus aucun paquet n'est perdu par le modèle lorsque l'erreur sur la position de la chargeuse est de 30 cm ou moins. Pertes qui ont été identifiées avec la mesure de performance basée sur l'identifiant unique des paquets et qui étaient dues au non-respect de certaines règles d'affaires par l'algorithme #2 (voir section précédente). De plus, le nombre de paquets perdus en moyenne pour une incertitude au-delà de 30 cm est de 0,33. Il s'agit d'erreurs liées à la position GPS qui n'est pas assez précise pour détecter l'emplacement d'entrée de la chargeuse dans une zone. Par exemple, lors du déchargement d'un séchoir, si la chargeuse devait ramasser les quatre derniers paquets d'un empilement, mais qu'étant donné l'incertitude sur sa po-

sition d'entrée dans la zone, elle a plutôt ramassé les paquets de l'empilement situé juste à côté où six paquets étaient présents, la chargeuse n'a alors ramassé que deux paquets (d'après les règles d'affaires établies, les empilements de trois paquets de hauts par deux paquets de profonds, se font toujours ramassés suivant la règle 2-4, les deux paquets du dessus suivit des quatre paquets du bas), ce qui cause une perte de deux paquets.

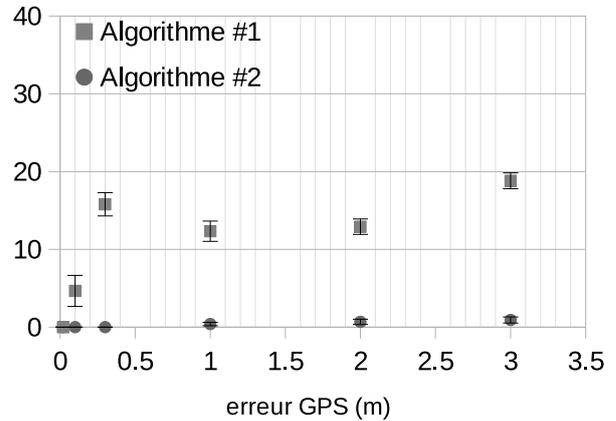


FIGURE 9 – Nombre de paquets perdus par chaque algorithme en fonction de l'erreur GPS (suivis par type de produit)

5 CONCLUSION

Avec la collaboration d'une entreprise du secteur des produits forestiers, nous avons entrepris la mise en place d'un jumeau numérique permettant de maintenir un inventaire géolocalisé d'une cour à bois.

Deux algorithmes de détection des événements permettant ainsi le maintien d'un inventaire géolocalisé ont été proposés et testés. La position de la chargeuse et la connaissance des moments de ramassage et de dépôt des paquets ainsi que le nombre de paquets ramassés ne sont pas suffisants pour compenser l'incertitude sur la position de la chargeuse dans la cour à bois puisque le niveau de précision nécessaire est difficilement atteignable pour une chargeuse en mouvement. En effet, atteindre ce niveau de précision sur la géolocalisation d'un véhicule en mouvement nécessite l'utilisation de techniques et de systèmes complexes qui sont encore à l'étude (Dong, Y. 2020).

Toutefois, cet article démontre également qu'avec l'algorithme de détection des événements en fonction des entrées/sorties de zone, il est possible de maintenir un inventaire géolocalisé dans le cas où aucune distinction n'est faite entre les paquets contenant le même produit. Également, il est possible de maintenir un inventaire géolocalisé à l'aide de l'algorithme de construction de segments à la condition que cer-

taines règles d'affaires soient énoncées a priori et que l'opérateur de la chargeuse respecte celles-ci.

Comme travaux futurs, il serait intéressant de valider une approche hybride afin de compenser les lacunes de chacun des deux algorithmes de détection des événements. De plus, le développement de nouveaux algorithmes permettant de détecter et de corriger certaines situations exceptionnelles, notamment un chargement de séchoir qui ne serait pas au maximum de sa capacité ou qui ne serait pas entièrement vidé, permettrait également d'atténuer le nombre de paquets perdus. Nous croyons également que réorganiser la cour autour de zone mieux délimitée faciliterait le travail de l'algorithme basé sur les segments.

REMERCIEMENTS

Nous tenons, dans un premier temps, à remercier toute l'équipe de PMP Solutions pour leur implication dans le projet. Sans leurs précieux conseils et le partage de leurs connaissances, il aurait été impossible de mener à bien ce projet.

Finalement, nous tenons à remercier Jordan Côté, Dominic Drolet, Pierre-Guillaume Laurin et Elliot Leclerc de nous avoir permis d'utiliser et de modifier l'application qu'ils ont développée dans le cadre du cours GLO-2004.

REFERENCES

- Bajgiran, O.S., Zanjani, M.K. et Nourelfath, M., 2016. The value of integrated tactical planning optimization in the lumber supply chain. *International Journal of Production Economics*, 171, p. 22-33.
- Beaudoin, D., LeBel, L. and Frayret, J.M., 2006. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1), p. 128-140.
- Boschert S. et Rosen R., 2016. Digital twin—the simulation aspect. *Mechatronic futures*, Springer, p. 59-74.
- Dong, Y., Zhang, L., Wang, D., Li, Q., Wu, J. et Wu, M., 2020. Low-latency, high-rate, high-precision relative positioning with moving base in real time. *GPS Solutions*, 24(2), p. 1-13.
- Dramm JR., 2004. Log sort yard economics, planning and feasibility. *US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, 146.
- Dumetz L., 2014. Modélisation des systèmes d'approvisionnement des scieries de bois de résineux en France et au Canada et propositions d'amélioration grâce aux technologies d'identification. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.
- Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.M., Rousseau, A., Lemieux, S. and D'Amours, S., 2010. Distributed operations planning in the lumber supply chain : models and coordination. *International Journal of Industrial Engineering : Theory, Applications and Practice*, 17(3).
- Gaudreault, J., Frayret, J.M., Rousseau, A. and D'Amours, S., 2011. Combined planning and scheduling in a divergent production system with co-production : A case study in the lumber industry. *Computers & Operations Research*, 38(9), p.1238-1250.
- Marier, P., Gaudreault, J. et Robichaud, B., 2014. Implementing a MIP model to plan and schedule wood finishing operations in a sawmill : lessons learned. *10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM'2014)*, Nancy, France.
- Marier, P., Gaudreault, J. et Noguer, T., 2016. Kiln Drying Operation Scheduling with Dynamic Composition of Loading Patterns. *Proceeding of the 6th International Conference in Information Systems Logistics and Supply Chain (ILS'2016)*, Bordeaux, France.
- Müller, F., Jaeger, D. and Hanewinkel, M., 2019. Digitization in wood supply—A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, p. 206-218.
- Murphy, G., Clark, J.A. et Pilkerton, S., 2012. Current and Potential Tagging and Tracking Systems for Logs Harvested from Pacific Northwest Forests. *Western Journal of Applied Forestry*, 27(2), p. 84-91.
- Ogaja, C., 2016. Geomatics engineering : a practical guide to project design, *CRC Press*.
- Pieskä S., Luimula M., Alaspää J., Pitkäaho, T. et Tervonen, J., 2009. Smart wheel loader based on RFID and positioning technologies. *In Proc the 8th International Conference and Workshop on Ambient Intelligence and Embedded Systems (AmiEs'2009)*, Funchal, Portugal.
- Skoglund, M., Petig, T., Vedder, B., Eriksson, H. and Schiller, E.M., 2016. Static and dynamic performance evaluation of low-cost RTK GPS receivers. *In 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV*, p. 16-19.
- Sun, Q.C., Odolinski, R., Xia, J.C., Foster, J., Falkmer, T. et Lee, H., 2017. Validating the efficacy of GPS tracking vehicle movement for driving behaviour assessment. *Travel Behaviour and Society*, 6, p. 32-43.
- Team, G.P., 2017. Global positioning system (gps) standard positioning service (sps) performance analysis report. *GPS Product Team : Washington, DC, USA*.

- Theresia, J., Widyadana, I.G.A. et Wahjudi, D., 2019. Optimal Kiln Dry Allocation for Dry Timber Preparation with Minimal Cost and Available Capacity. *Jurnal Teknik Industri*, 21(1), p. 43-48.
- Tiberius CCJM. et Borre K., 2000. Are GPS data normally distributed. *Geodesy Beyond 2000*, p. 243-248.
- Trzcianowska M., LeBel L. et Beaudoin D., 2019. Performance analysis of log yards using data envelopment analysis. *International Journal of Forest Engineering*, 30.2, p. 144-154.
- US DoD, 2020. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard annexe A. *United States Coast Guard Navigation Center*, citesseer.
- Williams, M. and Morgan, S., 2009. Horizontal positioning error derived from stationary GPS units : A function of time and proximity to building infrastructure. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 9(2), p. 275-280.
- Wing, M.G., Eklund, A. et Kellogg, L.D., 2005. Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability. *Journal of forestry*, 103(4), p. 169-173.
- Zandbergen PA., 2008. Positional accuracy of spatial data : Non-normal distributions and a critique of the national standard for spatial data accuracy. *Transactions in GIS*, 12(1), p. 103-130.
- Zanjani, M.K., Nourelfath, M. et Aït-Kadi, D., 2011. Production planning with uncertainty in the quality of raw materials : a case in sawmills. *Journal of the Operational Research Society*, 62(7), p. 1334-1343.
- Zanjani, M.K., Bajgiran, O.S. et Nourelfath, M., 2016. A hybrid scenario cluster decomposition algorithm for supply chain tactical planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 252(2), p. 466-476.
- Zogg JM, 2009. GPS-Essentials of Satellite Navigation. *u-blox Holding AG*.